

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УДАЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

*В статье рассмотрена задача выравнивания расходов в системе удаления вредных газов из корпуса алюминиевого производства. Решение задачи осуществлялось при помощи гибридного 1D/3D алгоритма, предназначенного для решения разномасштабных задач гидродинамики. Особенностью данного алгоритма, основанного на SIMPLE процедуре, является единое уравнение на поправку давления для всей расчетной области. В результате расчета было определено гидравлическое сопротивление выравнивающих заслонок и общее разрежение в системе газоотделения для выравненного варианта.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, вычислительная гидродинамика, Теория Гидравлических Цепей, гибридный 1D/3D алгоритм, система газоудаления

В современном мире численное моделирование играет ведущую роль в исследовании, проектировании и оптимизации различных технологических систем, а также отдельных устройств и механизмов. В сфере моделирования гидродинамических задач исторически сложились два основных относительно независимых подхода.

Первый подход - методы Теории Гидравлических Цепей (ТГЦ) [1,2], основанные на постулатах Кирхгофа и оперирующие интегральными балансами потоков. Геометрическое представление модели в таком подходе выполнено в виде ориентированного графа [3]. Методы ТГЦ позволяют рассчитать гидравлические, тепловые и массовые потоки в системах большой протяжённости (например, модель теплоснабжения города) при относительно небольших вычислительных затратах. Главным недостатком таких методов является сильная зависимость результата расчёта от эмпирических данных, например, коэффициента местного гидравлического сопротивления, коэффициента телепередачи и так далее. Причём при изменении режима течения значение многих коэффициентов приходится пересчитывать.

Вторым подходом является применение методов вычислительной гидродинамики [4-7], при этом пространственные модели позволяют получить поля характеристик системы, распределённые по объёму исследуемого объекта. В основе данных методов лежит численное решение уравнений Навье – Стокса. Сильной стороной пространственного метода является меньшая зависимость модели от эмпирических данных, а основным недостатком – значительные вычислительные затраты.

Однако существует класс задач, в которых применение одного подхода либо невыгодно, либо невозможно. Под этот класс попадают модели систем, которые одновременно состоят из протяжённых сетевых элементов (система кровеносных сосудов, тепловые трассы, русла рек и тому подобное) и пространственных элементов (например, разветвление аорты, сложные раздающие или собирающие устройства, дамбы и тому подобное). При этом сетевые элементы слишком длинные, чтобы их моделировать пространственными методами, а пространственные невозможно представить в виде набора ветвей. Для корректного расчёта процессов, протекающих в таких системах, стали строить гибридные или разномасштабные модели [8-12].

Существует три основных вида гибридных моделей.

Полностью разделённая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются по отдельности. В этом случае по результатам расчёта одной из частей определяют значения входных параметров для другой. Например, определение гидравлического сопротивления сложного пространственного элемента производится путём проведения численного эксперимента, а полученные значения используются в сетевой модели [13,14]. Основным недостатком такого метода является то, что при изменении входных условий возникает необходимость пересчитывать входные параметры заново.

Гидравлически единая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются одновременно. Такой подход, по сравнению с предыдущим, удобен тем, что нет необходимости проведения ручного обмена данными, и при изменении граничных условий перерасчёт происходит автоматически. Основная проблема такого подхода - организация гидродинамической связи между двумя частями задачи.

Гидравлически не связанная модель - это модель, в которой сетевые элементы «пронизывают» пространственную часть и связь происходит по интегральным характеристикам стенки трубы/канала: например, по давлению [15] или тепловому потоку [16].

В данной работе приведён пример применения гибридной модели для оптимизации системы удаления вредных газов из электролизного корпуса алюминиевого завода (второй вид модели). Авторами предложен гибридный алгоритм, в котором связь между различными частями модели осуществляется за счёт построения единого уравнения для расчёта поля давления. Такой подход обеспечивает высокую сходимость по сравнению с

традиционными методами решения гибридных задач, предполагающими раздельное решение пространственной и сетевой частей. Ранее был реализован алгоритм для ламинарных течений в микроканалах [17]. Для моделирования в системе удаления вредных газов была реализована возможность расчёта турбулентных режимов течения.

### Постановка задачи

В России на долю технологии Содерберга приходится около 85% производимого алюминия. Данная технология характеризуется более низкой себестоимостью алюминия и более высокими, по сравнению с производством на обожженных анодах, удельными выбросами загрязняющих веществ. Высокие выбросы являются следствием того, что система сбора, эвакуации и очистки анодных газов не всегда обеспечивает их обезвреживание до уровня, определенного нормами предельно допустимых выбросов (ПДВ) и предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Также вместе с газообразными выбросами происходит и выброс пыли, которая помимо отравляющего действия приводит к зарастанию газоходов и, как следствие, резкому ухудшению их работы. Для наиболее эффективной работы система удаления должна забирать газ от электролизной ванны в строго заданном диапазоне. При меньших объемах забора анодные газы могут проникать непосредственно в пространство цеха, а при больших может произойти срыв пламени в устройствах дожигания (горелках). Система газоудаления представляет собой сильно разветвленную сеть типа «дерево», что приводит к задаче выравнивания расхода по всем её уровням.

На Рис. 1 показана топологическая схема системы газоходов электролизного корпуса алюминиевого производства, в которой можно выделить несколько подуровней. Обвязка электролизной ванны (Рис. 1а): в процессе электролиза выделяются анодные газы (1), которые собираются газосборным куполом (2). В горелках (3), обычно расположенных по углам электролизной ванны, происходит смешение с воздухом (4) и сжигание горючих анодных газов и смолистых веществ. Затем продукты сгорания по опускным газоходам (5) отводятся под корпус, где попадают в подкорпусные газоходы (6). Соединённые одним подкорпусным газоходом ванны образуют бригаду (Рис. 1б). От всех бригад корпуса по выносным газоходам вредные газы выводятся за его пределы, после этого собираются выносными газоходами (7) в один и поступают в систему газоочистки (8). Обычно одна очистная установка обслуживает 2 корпуса (Рис. 1в).

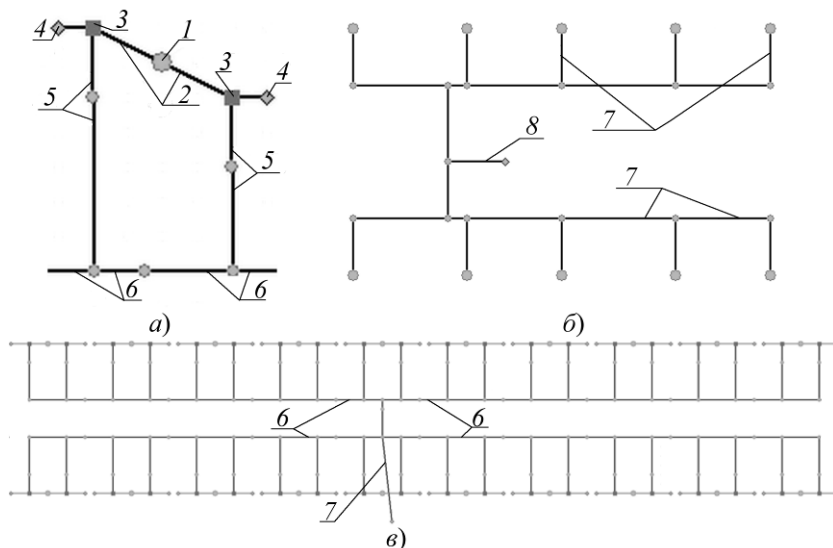


Рис. 1. Система газоходов электролизной серии. а) обвязка электролизной ванны: 1 – источник анодных газов, 2 – газосборный колокол, 3 – горелка, 4 – подача воздуха в горелку, 5 – опускные газоходы, 6 – подкорпусной газоход. б) бригада электролизных ванн: 6 – система подкорпусных газоходов переменного сечения, 7 – выносной газоход. в) система выносных газоходов: 7 – выносные газоходы от двух корпусов, 8 – общий газоход в систему отчистки и дымовую трубу

Предприятия российской алюминиевой промышленности регулярно проводят работы по уменьшению концентрации анодного газа внутри корпусов и общему сокращению вредных выбросов в атмосферу [18-21]. Одной из таких работ была модернизация узла сбора анодных газов от нескольких корпусов Красноярского алюминиевого завода на примере 19-го корпуса. Основной целью работы было определение возможности регулирования расходов от каждой бригады корпуса, исходя из условия, что расход от одной ванны находится в диапазоне от 800 до 900 м<sup>3</sup>/час. Электролизные ванны 19-го корпуса разделены на четыре бригады (см. Рис. 2). На каждую бригаду приходится разное количество ванн: 1-я и 2-я бригады – 24 ванны, 3-я бригада – 26 ванн и 4-я – 20 ванн. Выравнивание расходов предполагается осуществить с помощью регулирующих заслонок.

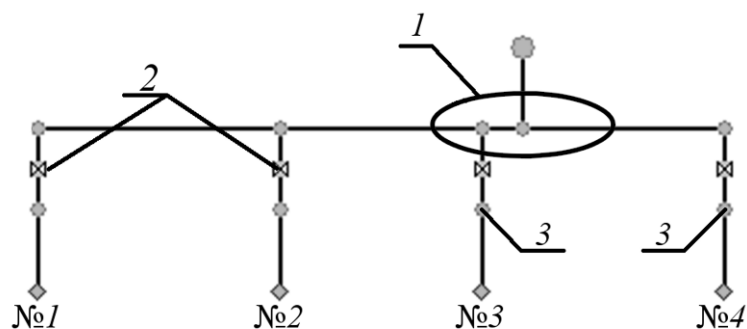


Рис. 2. Система выносных газоходов бригад 19 корпуса: №№1 - 4 – номера бригад, 1 – сборный коллектор, 2 – регулирующие заслонки, 3 – точки замера

Главной особенностью данного выносного газохода является наличие центрального сборного коллектора (пространственная часть представлена на Рис. 3), потери давления в котором составляют примерно половину от общей потери давления в исследуемой части системы. В общем случае моделирование такой задачи в рамках одного из основных подходов (полностью 3D или полностью ТГЦ) невозможно. Размер расчётной сетки для построения полностью пространственной модели всего корпуса будет слишком велик, так как длины некоторых участков больше 100 м, также при таком подходе невозможно представить бригаду эквивалентным элементом. В то же время, при построении полностью сетевой модели необходимо определить гидравлическое сопротивление коллектора для разных режимов его работы, что также является достаточно трудоемкой задачей. Конструктивные элементы (отвод от третьей бригады, сборный тройник и диффузор) находятся слишком близко (3 – 5 калибров) и оказывают влияние друг на друга, что делает невозможным расчет их гидравлического сопротивления по справочным данным. Применение разделённой модели для определения гидравлического сопротивления каждого отвода коллектора также не подходит, так как есть предположение, что до и после выравнивания расходов оно будет сильно отличаться. Построение гибридной модели позволяет устранить эти недочеты: протяженные элементы представлены в виде сети, сборный коллектор в виде пространственного элемента (см. Рис. 3), а сопротивление коллектора будет рассчитано для конкретных величин расходов.

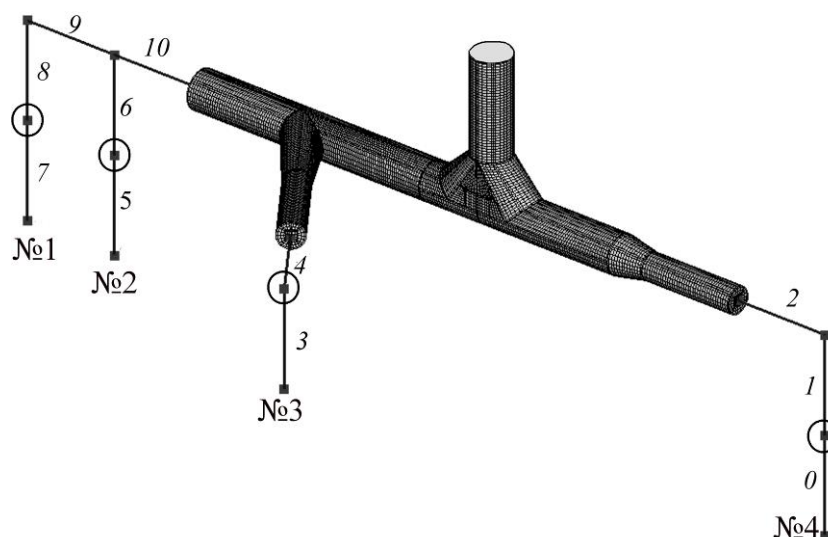


Рис. 3. Гибридная модель системы выносных газоходов 19 корпуса: №№1 - 4 номера бригад, 0 –10 номера ветвей, кругом выделены точки замера

### Математическая модель

Реализация предложенного в работе гибридного алгоритма выполнена на базе программного пакета SigmaFlow [22-24], предназначенного для решения широкого спектра задач гидродинамики. Авторы статьи расширили функционал данного пакета на решение сетевых и гибридных задач [16,17,25].

Суть методики следующая. Исходная задача разбивается на пространственную и сетевую части, взаимодействие между которыми осуществляется на основе решения общего уравнения на поправку давления.

Для дискретизации уравнений гидродинамики в пространственной области применяется метод контрольного объема, используется неструктурированная сетка из гексаэдральных ячеек, значения искомых

переменных определяются в центрах контрольных объемов. Значения величин на гранях контрольных объемов определяются в зависимости от схемы аппроксимации. Течение среды в пространственной части описывается уравнениями Рейнольдса:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\nabla (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}^m + \boldsymbol{\tau}^t), \quad (2)$$

где  $p$  – давление,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\rho$  – плотность,  $\boldsymbol{\tau}^m$  – тензор вязких напряжений и  $\boldsymbol{\tau}^t$  – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса:

$$\tau_{ij}^m = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k,$$

где  $v_i$  – компоненты вектора скорости,  $\mu$  и  $\mu_t$  – молекулярная и турбулентная вязкость жидкости,  $k$  – удельная кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Для замыкания уравнений при турбулентном режиме течения использовалась модель  $k$ - $\omega$  SST [26]. Граничные условия для турбулентных характеристик на границе двух частей задач заданы исходя из условий Неймана.

Закон сохранения энергии для пространственной части задачи:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla h \right), \quad (3)$$

где  $h$  – энтальпия,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – температура,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость,  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля.

Для описания сетевой части задачи используются методы Теории Гидравлических Цепей [1,2]. Гидравлическая цепь состоит из набора узлов ( $N$ ) и ветвей ( $U$ ), представляющих собой ориентированный граф, матрица связей которого представляется в виде

$$D_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \in O_i \\ -1, & \text{если } l \in I_i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $l$  – номер ветви,  $l \in O_i$  – множество ветвей, исходящих из  $i$ -го узла,  $l \in I_i$  – множество ветвей, входящих в  $i$ -ый узел. Используя выражение (4), задачу потокораспределения в сети можно свести к сочетанию закона сохранения массы в узле (5) и закона сопротивления в трубе (6):

$$\sum_{l \in U_i} D_{il} q_l = Q_i, i \in N, \quad (5)$$

$$s_l |q_l| q_l = \sum_{i \in N} D_{il} \cdot p_{Di} + h_l, l \in U, \quad (6)$$

где  $q_l$  – массовый поток на ветви,  $Q_i$  – источник массы, существующий в узле,  $p_{Di}$  – давление в узле,  $h_l$  – дополнительный напор ветви,  $s_l$  – коэффициент сопротивления, определяемый по следующей формуле:

$$s_l = \left( \xi + \frac{\lambda l}{d} \right) \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot f^2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент линейного трения,  $d$  – гидравлический диаметр ветви,  $l$  – длина ветви,  $f$  – площадь сечения трубы,  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Уравнение энергии для сетевой части задачи представлено в виде:

$$h_i \cdot \sum_O (q_O) = \sum_I (q_I \cdot h_I) + Q_i \cdot h_q + S_{h_i}, \quad (7)$$

Здесь  $h_i$  – энтальпия в  $i$ -ом узле,  $O$  – множество узлов, по которым поток расходится по от  $i$ -го узла,  $I$  – множество ветвей, по которым поток приходит в  $i$ -й узел,  $h_q$  – энтальпия источника массы,  $S_{h_i}$  – тепловой источник (сток) в  $i$ -ом узле.

Взаимосвязь поля скорости и давления в пространственной части осуществляется при помощи SIMPLE-подобной процедуры [4]. Для ТГЦ-части задачи SIMPLE-подобный алгоритм был адаптирован следующим образом.

На первом этапе решаем линеаризованное уравнение на расход в трубе (6) и получаем приближенное значение расхода на ветвях:

$$s_l |q_l^{k-1}| q_l^k = \sum_{i \in N} D_{il} \cdot p_{Di}^k + h_l, l \in U, \quad (8)$$

где  $k$  – номер итерации. Найденные на первом этапе величины расходов, в общем случае, не удовлетворяют уравнению неразрывности. Для его соблюдения выполняется коррекция, в процессе которой решается уравнение (9) на поправку давления  $p'$  и определяется давление на следующей итерации (10).

$$\sum_{l \in U} D_{jl} \left( \tau_{br} \cdot \sum_{i \in N} D_{il} p_{Di}' \right) = q_j - \sum_{l \in U} D_{jl} q_l^k, j \in N, \quad (9)$$

где  $\tau_{br}$  – коэффициент, равный:

$$\tau_{br} = \frac{1}{s_l |q_l^k|},$$

В правой части уравнений (9) записан баланс расхода для данного контрольного объема или сумма расходов на ветвях, входящих в  $i$ -й узел и исходящих из него. Следующий этап – это получение новых значений давления в узлах

$$p^{k+1} = p^k + p', \quad (10)$$

где  $p^k$  и  $p^{k+1}$  – значения давления на предыдущей и текущей итерации.

Механизм объединения двух частей задачи осуществляется при помощи стыковочных ветвей (см. Рис. 4).

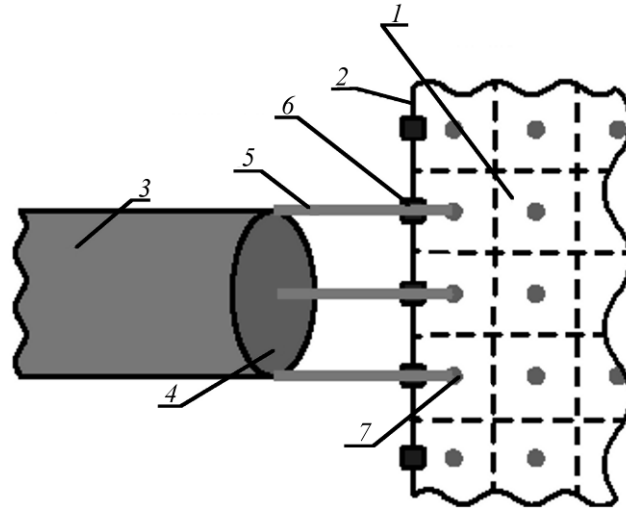


Рис. 4. Механизм объединения двух частей задачи: 1 – пространственная часть задачи, 2 – граница пространственной области, 3 и 4 – ветвь и узел сетевой части задачи, 5 – стыковочная ветвь, 6 – стыковочная грань, 7 – стыковочный контрольный объем

После расчёта приближенных значений скорости (2) и расхода (6) в разных частях задачи происходит процедура осреднения расхода через стыковочную ветвь 3 и входную границу пространственной области 2 (Рис. 4). Для этого от стыковочного узла 4 в каждый граничный контрольный объем пространственной области 5 строится стыковочная ветвь с минимальным гидравлическим сопротивлением.

$$q_{branch(i)} = q_{interface(i)}^* \frac{Q_{net}^* + Q_{cfd}^*}{2} \frac{1}{Q_{cfd}^*}, \quad (11)$$

Здесь  $q_{branch(i)}$  – расход по стыковочной ветви,  $q_{interface(i)}^*$  – расход через стыковочную грань пространственной области (поз. 6 на Рис. 4),  $Q_{net}^*$  – расход по стыковочной ветви, полученный в результате расчёта уравнения (6),  $Q_{cfd}^*$  – суммарный расход через стыковочные грани – из уравнения (2). Такой подход позволяет сохранить профиль скорости на границе пространственной области, что исключает из результатов решения потерю давления на восстановление формы потока после ударного профиля. Полученный расход  $q_{branch(i)}$  переходит в правую часть уравнения на поправку давления как для стыковочного узла, так и для каждого граничного

контрольного объема. После решения уравнений на поправку давления на стыковочных гранях задается среднее значение поправки давления.

$$p'_{\text{interface}(i)} = \frac{p'_{\text{net}(i)} + p'_{\text{cfd}(i)}}{2}. \quad (12)$$

Таким образом, предложенный алгоритм имеет вид:

1. Вычисление приближенного значения скорости (2) и расхода (6).
2. Интерполяция расходов между сетевой и пространственной частями (11)
3. Расчет уравнений на поправку давления в пространственной и ТГЦ частях (9)
4. Задание поправки давления на стыковочных гранях (12).
5. Коррекция скорости в пространственной части.
6. Определение нового поля давления
7. Решение уравнений модели турбулентности в пространственной подмодели.
8. Проверка критериев сходимости задачи и, при необходимости, запуск следующей итерации с первого пункта.

## Результаты

Для определения текущего состояния системы, а также корректного задания параметров и верификации гибридной модели, был проведен ряд замеров на выходе выносных газоходов бригад из-под корпуса. Для измерения статического давления  $p$  и динамического напора  $\Delta p$  в газоходах использовался дифференциальный манометр цифровой ДМЦ-01М с трубкой НИИОГАЗ и автоматической температурной коррекцией, температуры газов измерялись хромель-алюмелевой термопарой. Замеры проводились согласно общепринятым методикам [27] на прямых участках газоходных трактов после выхода их из-под корпуса. Для корректного сопоставления результатов объем удаляемых газов приводился к нормальным условиям (0 С; 101,3 кПа). Результаты замеров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты замеров сборных газоходов бригад

Точка замера	$\Delta p$ , Па	$p$ , Па	$T$ , °С	$w$ , м/с	$Q$ , тыс м <sup>3</sup> /час (при ст.у.)
1-я бригада	129,3	590,0	94,0	12,6	16,1
2-я бригада	214,0	988,0	101,0	16,4	20,6
3-я бригада	454,3	1542,0	110,0	24,1	29,6
4-я бригада	156,5	1050,0	127,0	14,5	17,0

По приведённым в таблице 1 данным бригады можно приближённо представить в виде ветви минимальной длины с заданным коэффициентом местного сопротивления, который определялся по формуле:

$$\xi_i = \frac{2 \cdot p_i}{\rho \cdot w_i^2}, \quad (9)$$

Здесь  $i$  – номер бригады,  $p_i$  – полное давление на выходе из нее,  $\rho$  – плотность газа,  $w_i$  – скорость газа на выходе из этой бригады. Из-за большого избытка воздуха в горелках [18] и его присосов в тракте подкорпусных газоходов, свойства газа сопоставимы со свойствами воздуха. Тогда плотность газа принимается как для воздуха со средней температурой 108 °С –  $\rho = 0,923$  кг/м<sup>3</sup>. После определения  $\xi_i$  переходим к заданию параметров на остальных ветвях модели. Сетевые элементы гибридной модели можно разбить на три группы:

1. Ветви, параметры которых задаются исходя из геометрических характеристик (ветви 2, 9, 10).
2. Ветви, моделирующие область, где будет находиться регулирующая заслонка (ветви 1, 4, 6, 8). Минимальная длина и сопротивление соответствуют открытой заслонке.
3. Ветви, описывающие бригаду подкорпусного газохода (ветви 0, 3, 5, 7). Способ определения их параметров описан ниже.

В таблице 2 приведены основные параметры сетевых элементов гибридной модели, шероховатость поверхности труб задавалась равной 1мм согласно справочным данным [28]. Пространственная часть задачи разбита на 85 тыс. гексагональных ячеек (см. Рис. 3). Была проведена проверка сетки на насыщение: при сетке 230000 ячеек отличие от модели с грубой сеткой по перепаду давления в пространственной части составило менее 4%.

Таблица 2. Параметры сетевых элементов гибридной модели

№ ветви	№ группы	Диаметр, м	Длина, м	Кэф. местного гидравлического сопротивления
0	3	0,82	1	11,37
1	2	0,82	1	0,34
2	1	0,82	135	1,61
3	3	0,82	1	5,75
4	2	0,82	1	0,34
5	3	0,82	1	7,83
6	2	0,82	1	0,34
7	3	0,82	1	7,73
8	2	0,82	1	0,34
9	1	0,82	149	1,63
10	1	1,22	171	4,1

Для расчёта были заданы следующие граничные условия: в крайних узлах сетевых элементов (узлы 1, 5, 8 и 11) задано условие фиксированного избыточного давления – 0 Па, а на выходе – суммарный расход 85000 м<sup>3</sup>/час.

На Рис. 5 показано сравнение расходов в расчёте и в эксперименте. Максимальное отклонение наблюдается для четвертой бригады и составляет примерно 6%, что меньше требуемой основной погрешности средств измерения объемного расхода газов на  $\pm 10\%$  (см. РД 52.04.59-85 [29]). Разрежение на выходе из коллектора равно 2416 Па.

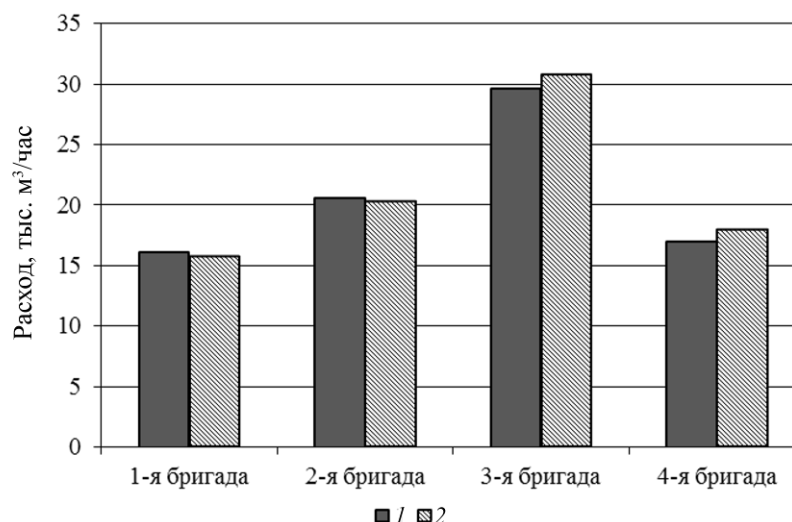


Рис. 5. Сравнение расчётных расходов по бригадам с данными эксперимента: 1 - результаты эксперимента, 2 - результаты расчёта

После подтверждения корректности модели была решена задача о выравнивании расходов. Так как выравнивание предполагается осуществлять при помощи регулирующих заслонок, то задача сводится к определению сопротивления заслонок для выравнивания расходов и оценке изменения общего разрежения в системе. Для определения дополнительного сопротивления граничные условия в модели были изменены: в граничных узлах (бригадах) был задан расход, соответствующий среднему расходу на ванну (850 м<sup>3</sup>/час), а на выходе было задано условие фиксированного давления. По разнице между максимальным давлением в одном граничном узле и давлением в других граничных узлах определяется избыток давления, который надо компенсировать заслонкой. Результаты расчёта представлены на Рис. 6 и в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчёта и значение сопротивления заслонок

Номер бригады	Расход, м³/час (при ст.у.)	Давление в граничном узле, Па	Избыточное давление, Па	Средняя скорость, м/с	Добавочное сопротивление
1-я бригада	20,4	2883	0	16,11	0
2-я бригада	20,4	2208	675	16,11	5,5
3-я бригада	22,1	1415	1468	17,5	10,1
4-я бригада	17	1985	898	13,4	10,6

На Рис. 6а показано распределение расходов по бригадам до и после выравнивания. Как видно из данного

рисунка от каждой бригады отбирается разное количество газа, однако если отбираемый от бригады расход газа привести к количеству ванн в бригаде, то видно, что во всех бригадах у каждой ванны отбирается одинаковое количество газа Рис. 6б. Задав нужное сопротивление на ветви, имитирующее заслонки, и вернув прежние граничные условия, был проведен контрольный расчёт, результаты которого показали совпадение с требуемыми расходами с точностью до 2%. При этом разрежение на выходе из коллектора выросло с 2416 Па до 2868 Па, то есть на 20%. В связи с этим, перед принятием решения о выравнивании расходов нужно убедиться в достаточной мощности дымососов.

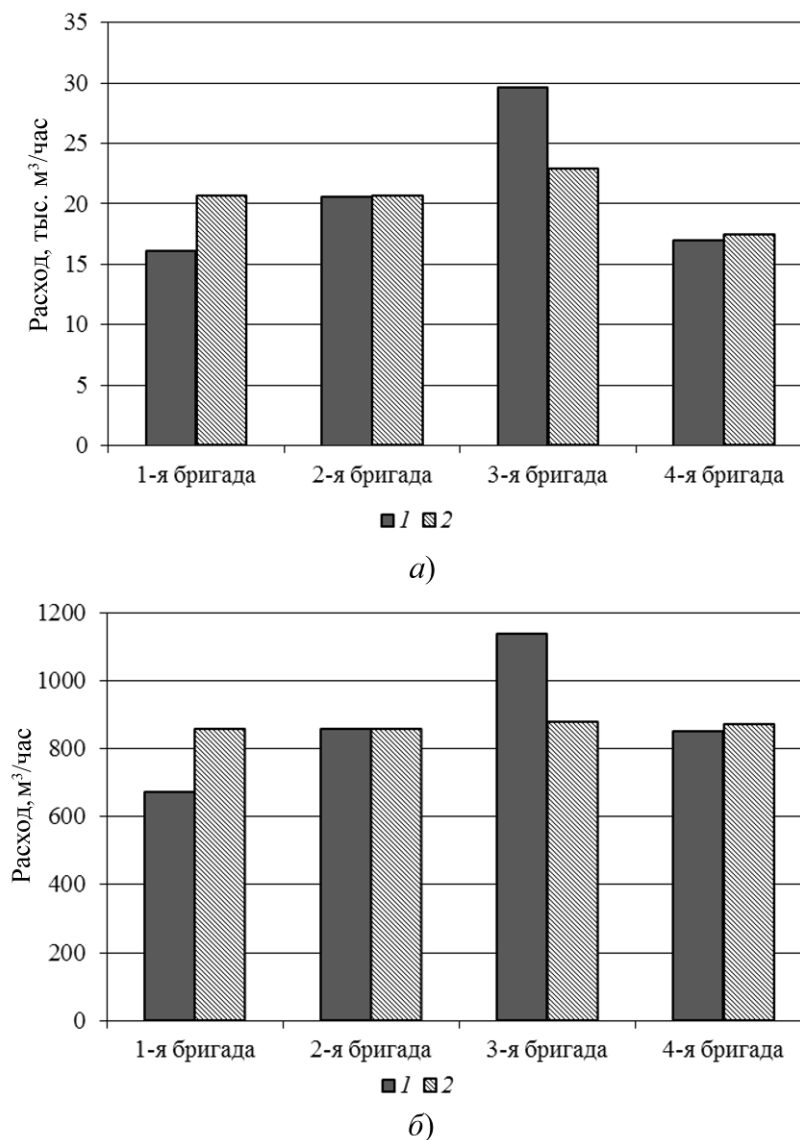


Рис. 6. Распределение расходов по бригадам 19 корпуса: 1 - до выравнивания, 2 - после выравнивания; а) - по бригаде в целом, б) - приведено к одной ванне)

После задачи выравнивания была поведена проверка изменения гидравлического сопротивления для каждого отвода. Для этого по формуле (10) был проведён расчёт сопротивления для каждого отвода до и после выравнивания. Результат расчёта представлен в таблице~4.

$$\xi_i = \frac{2 \cdot \Delta p_i}{\rho_i w_i^2}, \quad (10)$$

здесь  $i$  – номер входа коллектора,  $\Delta p_i$  – перепад полного давления между  $i$ -м входом в коллектор и выходом из него.



Таблица 4. Гидравлическое сопротивление отводов коллектора до и после выравнивания расходов газа

вариант	Сопротивление отводов коллектора		
	1-я, 2-я	3-я	4-я
до	8,9	2,1	15,1
после	8,2	4,4	9,5

Как видно из данной таблицы, для двух отводов бригад (3-я и 4-я) сопротивление отводов изменилось в два раза. Следовательно, процедуру определения гидравлического сопротивления отводов коллектора и их переноса в сетевую модель пришлось бы производить неоднократно, что нивелирует преимущество быстрого счета сетевой модели.

### Заключение

В работе представлено применение гибридной модели для выравнивания расходов газа в выносных газопроводах бригад электролизных ванн 19 корпуса Красноярского алюминиевого завода. Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными доказало корректность построенной модели.

На основании полученной модели было определено гидравлическое сопротивление, которое необходимо выставить регулируемыми заслонками на отводе от каждой бригады. Также расчёт показал, что по сравнению с текущей ситуацией, для выровненной схемы разрежение в системе необходимо повысить на 20%.

До проведения расчётов было выдвинуто предположение о невозможности расчёта данной задачи только методами пространственного моделирования. Помимо слишком большого количества ячеек в сетке (для решения протяженных участков газоходов), в пространственной модели представление бригады в виде отдельного элемента с заслонкой неизвестной геометрии вызывает определенные трудности.

После решения задачи о выравнивании расходов газа была проведена проверка возможности решения такой задачи при помощи разделённой гибридной модели. Для этого было проведено сравнение гидравлического сопротивления на отводах бригад до и после выравнивания. Результат проверки показал, что на двух отводах произошло изменение сопротивления почти в 2 раза. Следовательно, однократный перенос значений гидравлического сопротивления может привести к существенным погрешностям при расчёте.

На основании вышесказанного был сделан вывод о применимости данного алгоритма для моделирования такого класса задач.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. P. Merenkov and V. Ya. Khasilev. Theory of Hydraulic Circuits. Nauka, Moscow, 1985.
- [2] N. N. Novitskii, E. V. Sennova, M. G. Sukharev, et al. Hydraulic Circuits. Theory Development and Applications. Nauka, Novosibirsk, 2000.
- [3] Robin J. Wilson. Introduction to Graph Theory Longman Group Ltd. 1985 .
- [4] S. V. Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington, 1980; Energoatomizdat, Moscow, 1984.
- [5] Dale A. Anderson, John C. Tannehill, Richard H. Pletcher. Computational fluid mechanics and heat transfer. M.: Moscow, 1990.
- [6] Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics 3, rev. edition. Springer, 2002.
- [7] By'strov I.A., Isaev S.A., Kudriavtcev N.A., Leont'ev A.I. Chislennoe modelirovanie vikhrevoi` intensifikatsii teploobmena v paketakh trub (Numerical simulation of vortex intensification of heat exchange in packages of tubes). SPB: Sudostroenie, 2005.
- [8] Formaggia L. , Nobile F. , Quarteroni A. , Veneziani A. Multiscale modelling of the circulatory system: a preliminary analysis. // Computing and Visualization in Science, Vol.2, pp 75--83, 1999. DOI: 10.1007/s007910050030
- [9] Harvey Ho. et al. A hybrid 1d and 3d approach to hemodynamics modelling for a patient-specific cerebral vasculature and aneurysm. // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2009 Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5762 pp323--330, 2009.
- [10] T. K. Dobroserdova. Numerical Modeling of Blood Flow under Presence of Vascular Implants or Pathology, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Inst. Vychisl. Mat., Moscow, 2013).
- [11] A. F. Voevodin and V. S. Nikiforovskaya. "Numerical Modeling the Unsteady-State Hydrothermal Processes in Water Objects," in International Conference "Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment, and Practice" Dedicated to the 90th Anniversary of Academician N. N. Yanenko (Inst. Teoret. Prikl. Mekh., Novosibirsk, 2011).

- [12] *Twigt D., de Goede E., Zijl F., Chiu A. Y. W.* Coupled 1d–3d hydrodynamic modelling, with application to the pearl river delta. // *Ocean Dynamics*, Vol. 59 pp1077-1093, 2009. DOI: 10.1007/s10236-009-0229-y
- [13] *Filimonov S. A., Dekterev A. A., Boi'kov D. V.* Ispol'zovanie kompleksnogo podhoda pri issledovanii i optimizatsii rezhimov raboty sistem gazohodov (An integrated approach in the study and optimization of operating modes of flues system). Pipeline energy systems: Methodological and applied problems of simulation., 2015.
- [14] *Boi'kov D. V., Filimonov S. A.* Modelirovanie sistemy smazki reduktora hoda e'kskavatora (Modeling lubricating system of reducer of the excavator move). *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, T. 3 №4 p. 454-462, 2010.
- [15] *D'Angelo C.* Multiscale 1d-3d models for tissue perfusion and applications. // In 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)], 2008.
- [16] *Filimonov S. A., Dekterev A. A., Boi'kov D. V.* Chislennoe modelirovanie kozhuhotrubchatogo teploobmennika s pomoshch'iu gibridnogo algoritma (Numerical simulation of shell-and-tube heat exchanger with hybrid algorithm). *Thermal processes in engineering*, №8 c 86-97, 2014.
- [17] *Filimonov S. A., Dekterev A. A., Sentiabov A. V., Minakov A. V.* Modelirovanie sopriazhennogo teploobmena v sisteme mikrokanalov pri pomoshchi gibridnogo algoritma (Modeling conjugate heat transfer in the system of microchannels using hybrid algorithm). *Siberian journal of industrial mathematics*, T18 №3 cc 86--97, 2015.
- [18] *Storozhev Iu. I., Kulikov, B. P.* Py'legazovy'e vy'brosy aliuminievykh e'lektrolizerov s samoobzhigaiushchimisia anodami (Dust and gas emissions of aluminum electrolyzers with self aligawesa anodes). Krasnoyarsk: SFU, 2012.
- [19] *Burkat B. C., Drukarev V. A.* Sokrashchenie vy'brosov v atmosferu pri proizvodstve aliuminiia (Reducing emissions to the atmosphere during aluminium production). SPB, 2005.
- [20] *Neob'`iavlaiushchii' P. A., Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Storozhev Iu. I.* Raschetno-e'ksperimental'noe issledovanie gorelochnogo ustroi'stva po dozhiiganiuu anodnogo gaza (Numerical and experimental investigation of burner devices for afterburning anode gas). *Thermophysics and Aeromechanics.* , T14 №1 p. 51--160, 2007.
- [21] *Neob'`iavlaiushchii' P. A., Dekterev A. A., Leetvintsev K. Iu.* Issledovanie slozhnogo teploobmena v mnogokomponentnykh gazovykh smesiakh v prilozhenii k ustroi'stvam szhiganiia i transportirovki anodnykh gazov e'lektroliznogo proizvodstva aliuminiia (The study of complex heat transfer in multicomponent gas mixtures in application to devices of burning and transportation of anode gases of electrolysis aluminium production). The theses of reports and messages. XIV Minsk international forum on heat and mass transfer, №1 p. 214-216, 2012.
- [22] *Minakov A. V.* Chislennyi' algoritm resheniia zadach gidrodinamiki c podvizhny'mi granitsami i ego testirovanie (A numerical algorithm for the solution of problems of hydrodynamics c movable boundaries and testing it). *Computational mathematics and mathematical physics*, T24 №10 p. 61-72, 2014. DOI: 10.7868/S0044466914100111
- [23] *A. A. Dekterev, A. A. Gavrilov, and A. V. Minakov.* "Up-to-Date Features of the CFD code SigmaFlow for Solving the Thermal Physical Problems," *Sovremennaya Nauka: Issled., Idei, Result., Tekhnol.* 4 (2), 117– 122 (2010)..
- [24] *A. A. Gavrilov, A. V. Minakov, A. A. Dekterev, and V. Ya. Rudyak.* "A Numerical Algorithm for Modeling Laminar Flows in an Annular Channel with Eccentricity," *Sibirsk. Zh. Industr. Mat.* 13 (4), 3–14 (2010) [*J. Appl. Indust. Math.* 5 (4), 559–568 (2011). DOI: 10.1134/S1990478911040119
- [25] *Filimonov S. A., Dekterev A. A., Boi'kov D. V.* Gibridnyi' podhod dlia resheniia zadach TGTC, soderzhashchikh prostranstvenny'e e'lementy' (A hybrid approach for solving problems of THC containing spatial elements ). Pipeline system energy: mathematical and computer modeling, p. 46-55 2014.
- [26] *Menter, F.R.* Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows / F.R. Menter // *AIAA Paper.* — 1993, Vol. 93-2306. DOI: 10.2514/6.1993-2906
- [27] *Tcibul'skii' V. V. et al.* Metodicheskoe posobie po analiticheskomu kontroliu vy'brosov zagriazniaiushchikh veshchestv v atmosferu (Textbook for analytical control of emissions into the atmosphere). SPB, 2012.
- [28] *Idelchik I. E.* Handbook of hydraulic resistance. M.: Mashinostroenie, 1992.
- [29] «Rukovodiashchii' dokument. Okhrana prirody'. Atmosfera. Trebovaniia k tochnosti kontroliia promyshlennykh vy'brosov. Metodicheskie ukazaniia.» (Guidance document. Protection of nature. Atmosphere. Accuracy requirements for monitoring of industrial emissions. HOWTO). RD~52.04.59-85.

Filimonov Sergey

TORINS ltd., Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia

1. Neobyavlyayushchiy Pavel

TORINS ltd., Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia

2. Mikhienkova Evgeniya

Siberian Federal University, Svobodny 79/10, 660041, Krasnoyarsk, Russia

## **A HYBRID SIMULATION ALGORITHM FOR RESEARCH OF THE NOXIOUS GASES DISPOSAL SYSTEM OF ALUMINIUM PRODUCTION**

**Key words:** numerical modeling, CFD, hydraulic network models, hybrid 3D/0D method, gas purification system

*The article considers the problem of balancing of consumptions in the noxious gas disposal system from the case of aluminum production. This system is a highly branched network with a length of 2 kilometers, all baths divided into several teams, with each team have a different number of baths. Our team set a problem to evaluate the possibility of consumptions balancing between the teams so that each bath had a fixed volume of removable gas. As a rule, modeling such problems apply methods of the Theory of Hydraulic Circuits (the system is a set of nodes and branches). However, this system has complex geometry pipeway that cannot be represented as a set of network elements. So, the problem solution was carried out using the original hybrid 1D/3D algorithm intended for the solution of multiscale problems of hydrodynamics. A feature of this algorithm based on a SIMPLE procedure is a single equation for the pressure correction calculated for the rated operating conditions. The conjugation of the two parts of the tasks in the field of pressure allows to provide connectivity solutions, faster convergence and speed of calculations in comparison with accepted methods of solving this problems (multiscale), involving the separate use of spatial and network models, related to each other through communication on the contact interface. The result of the calculation, it was determined the hydraulic resistance of the balancing shutter and the total vacuum in gas purification system for the aligned version.*